

# MECANISMOS DE SALINIZAÇÃO EM ÁGUAS DO CEARÁ, RIO GRANDE DO NORTE E PIAUÍ

**Maria Marluca Freitas Santiago<sup>1</sup>; Horst Frischkorn<sup>2</sup> & Josué Mendes Filho<sup>1</sup>**

**Resumo** - Estudos da qualidade das águas de áreas do nordeste brasileiro, utilizando hidroquímica e isótopos ambientais, revelam a presença de concentrações salinas elevadas e a ocorrência de diferentes processos de salinização. O enriquecimento por evaporação foi observado no açude Pereira de Miranda – Ceará, a contribuição dos aerossóis marinhos foi encontrada nas áreas costeiras, o efeito da dissolução das rochas do aquífero foi observado nas águas subterrâneas na formação Serra Grande, da Bacia do Maranhão - Piauí, na Formação Açu na Bacia Potiguar e na Formação Missão Velha na Bacia Sedimentar do Cariri e o intemperismo de aluminossilicatos foi observado em águas no cristalino em Tauá.

**Palavras-chave** - salinização; isótopos ambientais; qualidade das águas

## INTRODUÇÃO

A região Nordeste do Brasil é conhecida pelo caráter semi-árido e as conseqüências sociais e econômicas que a escassez d'água acarreta. Conseqüência direta é a alta salinidade dos recursos hídricos sejam eles superficiais ou subterrâneos, que aumenta o problema, especialmente na parte onde o embasamento cristalino aflora, área esta que soma mais que 50% do Nordeste.

Em uma análise estatística de mais que 400 amostras de todo o Nordeste, Leite mostrou que somente 17% tem resíduo seco menor que 1.000 mg/L, 50 % tem valores menores que 2.900 mg/L, 20% apresentam mais que 7.000 mg/L e ainda 9% tem mais que 10.000 mg/L de resíduo seco.

---

<sup>1</sup> Departamento de Física - UFC, Tel (85)2889913, Fax: (85) 2874220 E-mail:marluca@fisica.ufc.br

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - UFC , Tel: (85)2889775. E-mail:cariri@ufc.br

Esta má qualidade química das águas provocou inúmeras pesquisas a respeito. Porém, diferentes autores atribuem diferentes causas à salinização. Cruz (1967), estudando 400 análises químicas de águas subterrâneas no cristalino, defende uma origem externa para os sais; Schoff (1967) propõe que a salinidade é decorrente de diluição progressiva de sais deixados pela água do mar na última ingressão marinha, ocorrida no Cretáceo Superior; Cruz e Melo (1968), estudando 1200 análises químicas, justificam as altas salinidades como decorrentes do efeito de capilaridade; Rebouças (1973) e Starinsky et al. (1983) ressaltam a influência dos sais aerotransportados e Tardy (1971) identificou o efeito da hidrólise dos silicatos nos solos bem drenados sobre a salinidade das águas subterrâneas. Mais recentemente, a aridez da região e o ambiente edáfico e litológico entraram na discussão (Oliveira e Batista, Suassuna).

Muitas vezes os autores reclamam exclusividade ou, pelo menos, dominância dos processos discutidos. A verdade, certamente, é que todos os mecanismos de salinização discutidos existem, variando em importância de área para área, de aquífero para aquífero e, as vezes, até de ano em ano, dependendo da variação interanual da pluviosidade.

Apresentamos, a seguir, resultados de pesquisas do grupo Hidrologia Isotópica da UFC, referentes a águas superficiais e subterrâneas em aquíferos sedimentares e cristalinos, onde predominam diferentes processos definidos:

- (i) Em aquíferos costeiros, aqui representados por uma área do município de Caucaia, na Região Metropolitana da Grande Fortaleza, a salinização se processa, basicamente, por sais marinhos aerotransportados (sea spray). Este caso encontra-se detalhadamente discutido em outro trabalho apresentado neste Congresso (Aguiar et al. 2000).
- (ii) Açudes na faixa costeira do Ceará (representados pelo açude Pereira de Miranda em Pentecostes - Ceará), onde a deposição seca e úmida de aerossóis e a lixiviação de produtos de intemperismo do cristalino têm o papel importante no sentido de representar fontes de sais é onde o processo principal de salinização é a evaporação (Santiago 1984).
- (iii) No aquífero Serra Grande, no sudoeste do Estado do Piauí, a salinização é interna, por dissolução no aquífero (Frischkorn et al. 1984).

- (iv) No aquífero Açú, Rio Grande do Norte, a salinização também recebe uma grande contribuição do processo de dissolução no aquífero (Frischkorn et al. 1988).
- (v) No sistema Aquífero Superior no Vale do Cariri, sul do Ceará, a baixa salinidade da água no aquífero Rio da Bateria aumenta por mistura com águas mais salinizadas ascendentes do aquífero Missão Velha (Mendonça 1996).
- (vi) Nas águas de poços e fontes, da região cristalina de Tauá/Inhamuns – Ceará, os produtos do intemperismo de feldspatos são identificados Santiago et al. 1998).

## **CARACTERÍSTICAS DA REGIÃO DE ESTUDO**

O nordeste brasileiro se caracteriza climaticamente pelo tipo semi-árido onde ocorrem no ano dois períodos bem definidos: um úmido, quando aparecem precipitações pluviométricas e outro seco, sem chuvas ou com pluviosidade mensal extremamente baixa, menor do que 20 mm. A pluviosidade média anual varia de aproximadamente 1.400 mm na costa a 400 mm no interior.

O início da estação chuvosa varia com a posição geográfica, pois depende do movimento das frentes frias e da zona de convergência inter-tropical (ZCIT). No entanto, os primeiros meses do ano são os de maiores pluviosidades em qualquer local da região.

A temperatura anual média fica entre 25°C e 30°C, dependendo da posição geográfica e é um dos principais fatores que condicionam taxa de evaporação acima de 2 metros por ano.

## **MÉTODOS**

Os estudos de qualidade da água, a partir dos quais foram identificados os processos de salinização, foram realizados utilizando medidas de condutividade elétrica como parâmetro para a salinidade (onde vale a relação aproximada que 1 meq de ânions ou cátions corresponde a uma condutividade de 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) e de carbono-14 como indicador do tempo de residência da amostra em um “reservatório bem misturado” ou a idade da água em uma parcela isolada.

As medidas da atividade do carbono-14 nos bicarbonatos dissolvidos nas águas podem ser utilizadas para datar amostras de água subterrânea, uma vez que a

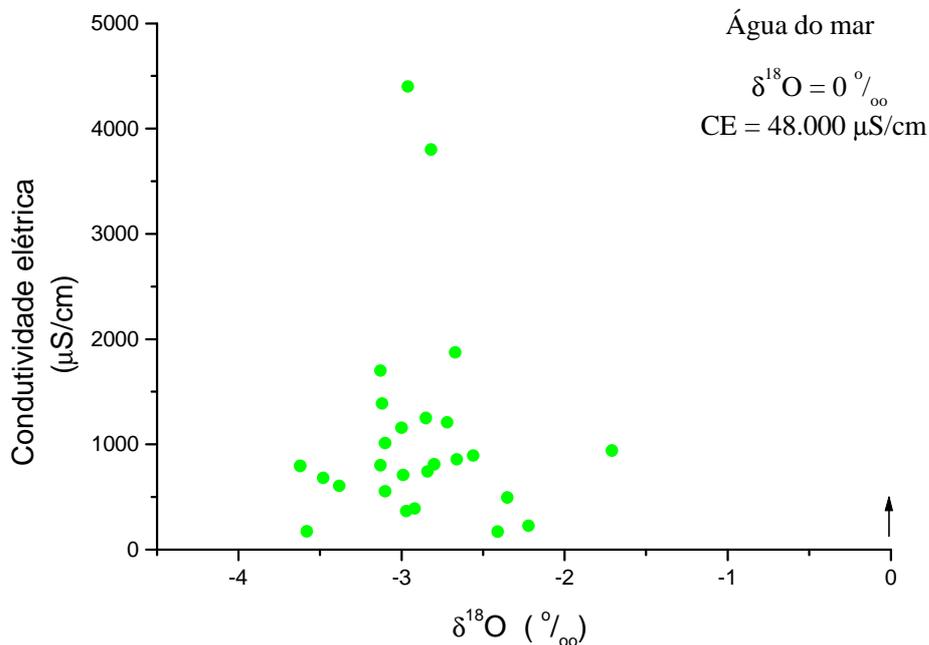
quantidade de átomos deste isótopo diminui exponencialmente com o tempo transcorrido desde que cessa a interação com a atmosfera, ou seja, desde a infiltração.

Para a datação com carbono-14, compara-se a atividade específica da amostra com a de um padrão (que representa a atividade do CO<sub>2</sub> da atmosfera em 1950) e através da Lei do Decaimento Radioativo determina-se o parâmetro temporal. Explicações mais detalhadas encontram-se, por exemplo, em Clark e Fritz (1997).

## **AQÜÍFEROS COSTEIROS**

Associando medidas de condutividade elétrica (CE) com valores de  $\delta^{18}\text{O}$  em águas subterrâneas em aquíferos costeiros na área do município de Caucaia, na Região Metropolitana da Grande Fortaleza, foi possível identificar o principal processo de salinização das águas.

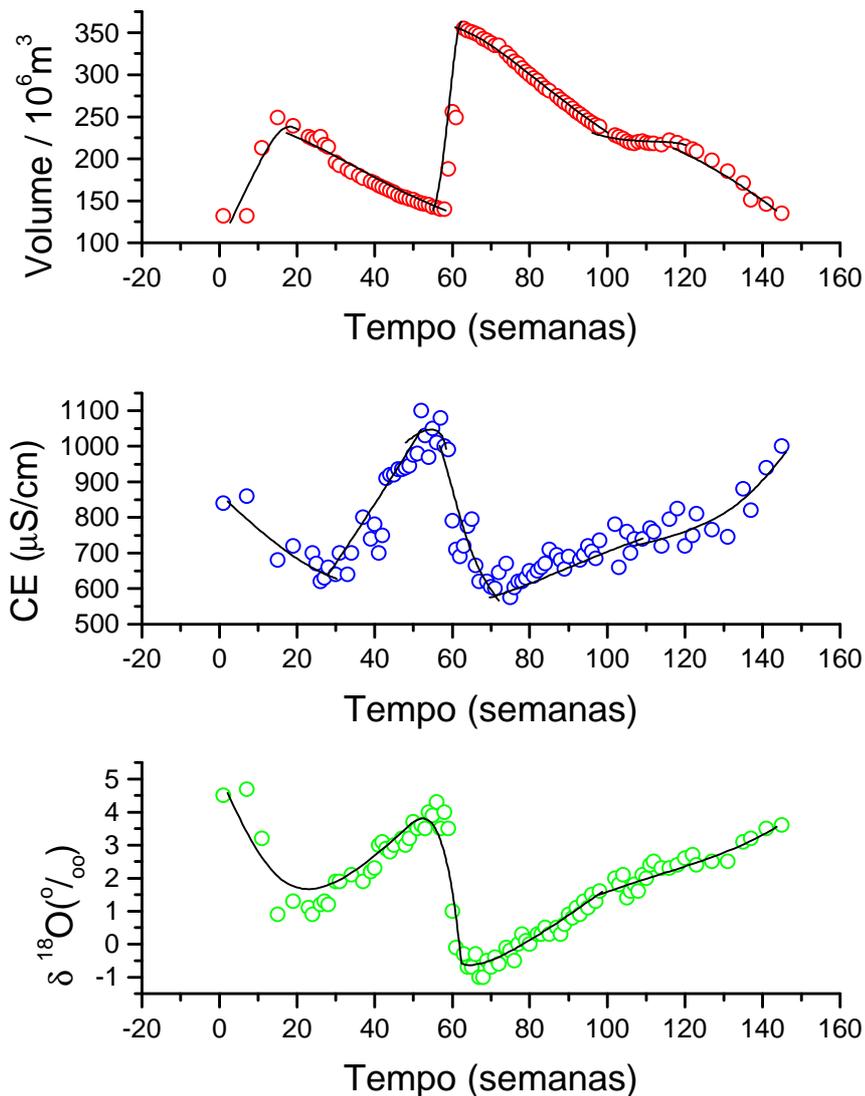
A figura 1 mostra que CE versus  $\delta^{18}\text{O}$  descarta a presença de água do mar pois os valores isotópicos estão muito distantes do valor marinho que é de 0 ‰ e as águas têm relativamente muito baixa salinidade para os mais elevados valores de  $\delta^{18}\text{O}$ . As medidas químicas mostraram águas cloretadas sódicas com razões de rCl/rNa em torno de 1,17 que permitiram identificar a salinização pela presença de sais marinhos aerotransportados, “sea spray” (Aguiar et al. 2000).



**FIGURA 1.** Condutividade elétrica versus  $\delta^{18}\text{O}$  em águas subterrâneas na região costeira de Caucaia – Ceará (Fonte: Aguiar et al. 2000)

### O AÇUDE PEREIRA DE MIRANDA

O açude Pereira de Miranda localiza-se a aproximadamente 90 km oeste de Fortaleza, no município de Pentecostes, e faz parte da Bacia do Rio Curú. Sua capacidade é de  $400 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Na figura 2 encontram-se, para quase 3 anos de observação, com início em janeiro 1980, os parâmetros volume, condutividade elétrica (para medir a salinidade) e  $\delta^{18}\text{O}$  como indicador evaporimétrico. Observa-se o ritmo anual hídrico com captação d'água no início do ano seguido pela redução de volume por retirada e evaporação durante a estação seca. Porém, as chuvas de 81/82 foram fracas resultando somente em um retardamento do esvaziamento do açude (em torno da 110ª semana).



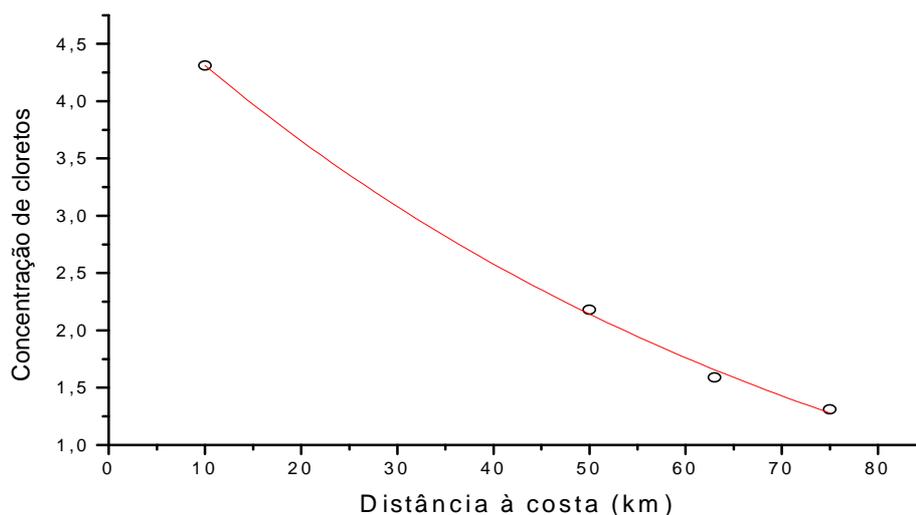
**Figura 2.** Variação do volume, da condutividade elétrica e de  $\delta^{18}\text{O}$  com o tempo, no açude Pereira de Miranda (Fonte: Santiago, 1984)

A condutividade elétrica acompanha fielmente as mudanças de volume com o produto dos dois parâmetros sendo aproximadamente constante. Em 1980, por exemplo, uma redução de volume em 40% resultou em um aumento da condutividade elétrica pela mesma porcentagem. As medidas de 0-18 comprovam a influência predominante da evaporação neste caso. A mudança de mais 3 ‰ no  $\delta^{18}\text{O}$  durante o mesmo intervalo corresponde, como experiências simultâneas com um tanque classe A demonstram (Santiago, 1984) a 40% de evaporação. Vê-se, então, que a salinização da água do açude processa-se exclusivamente através da evaporação. Processos de dissolução de

sais da rocha de base do açude ou contribuições de fontes salinas sub-superficiais não são identificados.

Igualmente, constata-se que as perdas d'água por evaporação superam em muito as retiradas por irrigação, as quais, desta maneira, não influenciam significativamente na remoção de sais. Somente em anos mais recentes, o Governo do Estado adotou com o projeto "filete d'água" uma política de melhor uso da água estocada em açudes visando uma qualidade melhor da água.

Tentando identificar as fontes de sais, foi feito um balanço dos elementos maiores, especialmente do ânion mais abundante  $\text{Cl}^-$ . A entrada de  $\text{Cl}^-$  é da ordem de 2,8 toneladas por ano por quilômetro quadrado da bacia hidrográfica. Deste montante, 1,2 toneladas resultam da "deposição úmida" de aerossóis como foi apurado medindo a concentração de  $\text{Cl}^-$  em chuvas como função da distância à costa (Figura 3).



**Figura 3.** Variação da concentração de cloretos nas chuvas em função da distância à costa (Fonte: Santiago, 1984).

O restante de 1,6 ton/(ano km<sup>2</sup>) provem da "deposição seca" de aerossóis no solo e dos produtos do intemperismo acumulados durante a época sem chuvas. O escoamento superficial durante a estação chuvosa se encarrega do transporte para o reservatório. Desta maneira, as fontes de sais são externas e o mecanismo principal no aumento de sua concentração é a evaporação.

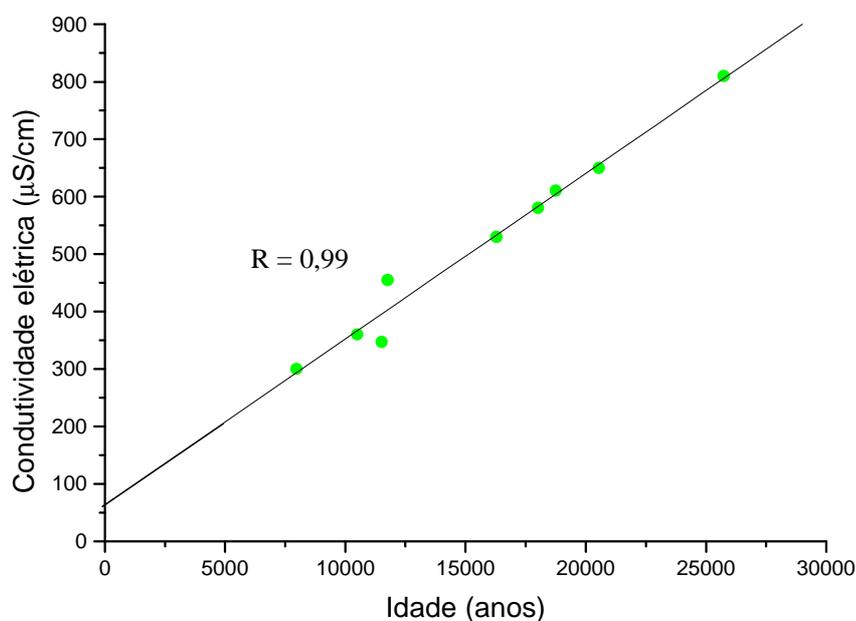
## O AQÜÍFERO SERRA GRANDE - PIAUÍ

Em água subterrânea protegida contra a influência da radiação solar e da conseqüente evaporação, os mecanismos são naturalmente diferentes. Consideramos a seguir, medidas no aquífero Serra Grande no sudoeste do Piauí, na região de Picos.

Foram descobertos, nos meados dos anos 70, os ricos recursos dos arenitos da formação Serra Grande na bacia Sedimentar Maranhão/Piauí, que aflora no prolongamento sul da serra do mesmo nome e mergulha suavemente no sentido noroeste sendo confinado pelo aquitarde Pimenteiras adquirindo condições de artesiano.

No âmbito das pesquisas de uma Missão Hidrogeológica Alemã foi instalado nosso Laboratório de Hidrologia Isotópica da UFC. Medidas de C-14, O-18 e, mais tarde, dos gases nobres dissolvidos em 14 amostras do aquífero permitiram a comprovação que a mudança climática na transição Pleistoceno /Holoceno (12.000 -10.000 anos antes de hoje), também no trópicos, foi acompanhada por uma elevação da temperatura da ordem de 5°C. (Frischkorn 1984).

A condutividade elétrica destas águas em função da idade de C-14 mostra que em 9 delas a concentração de sais é uma função direta do tempo de permanência da água no aquífero. A água entrou no aquífero com cerca de 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$  adquirindo salinidade a uma taxa de 28,8  $\mu\text{S}/1000\text{anos}$  ou  $\approx 18,4 \text{ mg}/1000\text{anos}$  por dissolução no aquífero (Figura 4).

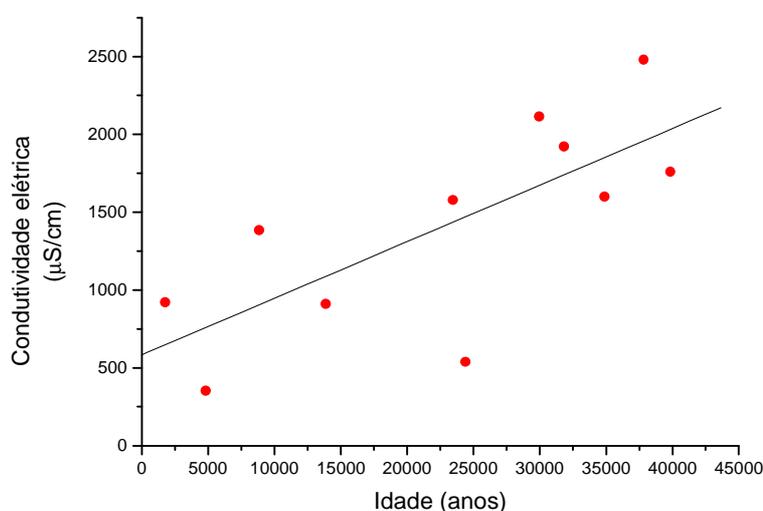


**Figura 4.** Condutividade elétrica das águas subterrâneas em Picos - Pi em função da idade (Fonte: Frischkorn et al.1984)

## O AQÜÍFERO AÇU/ RIO GRANDE DO NORTE

O aquífero arenítico Açú faz parte da Bacia Potiguar no Rio Grande do Norte. Aflora a cerca de 60 km da costa norte mergulhando no sentido norte, conduzindo a água para o mar a uma velocidade de alguns metros/ano. Exibiu artesianismo com jorro em grandes partes; condição esta já perdida pela exploração excessiva. A figura 5 revela, para a grande maioria das amostras, o mesmo comportamento já encontrado no aquífero Serra Grande. A salinidade cresce linearmente com a idade de C-14, indicando dissolução de sais no aquífero, com uma taxa de 36  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ou 23 mg/L a cada 1000 anos.

Somente amostras de poços na margem do aquífero não obedecem a estas regras; são águas marcadas fortemente pela mistura com água proveniente dos calcários da formação Jandaíra. No caso seguinte, do aquífero Missão Velha, a mistura de águas de procedências diferentes é a característica dominante.

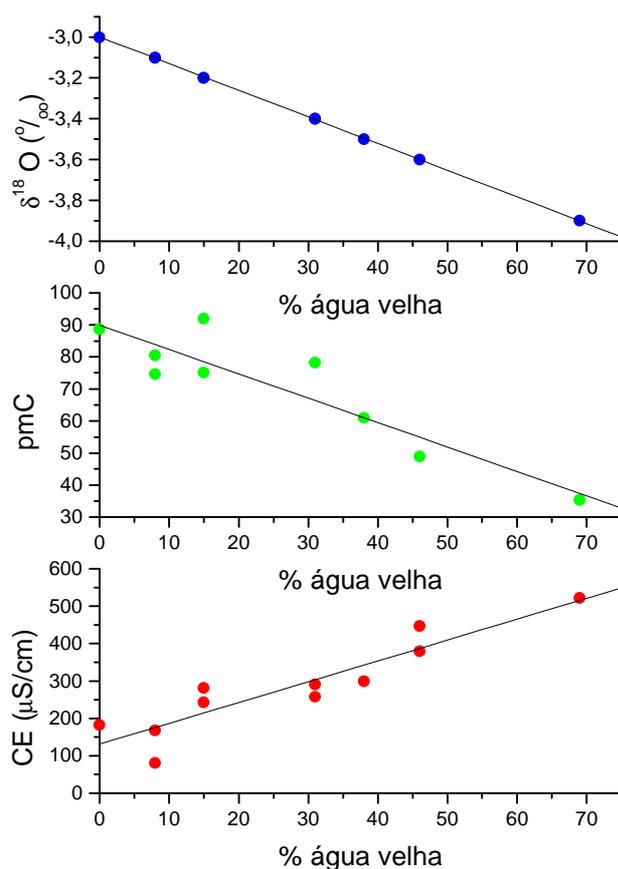


**Figura 5.** Condutividade elétrica das águas subterrâneas no Açú – Rio Grande do Norte em função da idade (Fonte: Frischkorn et al. 1988)

## O SISTEMA AQÜÍFERO SUPERIOR DO VALE DO CARIRI - CEARÁ

A cidade de Juazeiro do Norte no Vale do Cariri, extremo sul do Ceará, é abastecida, basicamente, a partir de uma bateria de 17 poços, 10 deles alinhados ao longo do Riacho dos Macacos e 7 agrupados na vizinhança da Lagoa Seca, captando no aquífero freático, o semi-confinado Rio da Batateira. A vazão total beira os 300  $\text{m}^3/\text{h}$  com 24h de

bombeamento e leva, em anos de reduzida pluviosidade, a um aumento excessivo do nível estático, secando riachos e lagos. Uma análise dos perfis de perfuração dos poços da Lagoa Seca revela deficiências locais no confinamento de base do aquífero explotado permitindo vazamento do aquífero Missão Velha para o Rio da Batateira. . Simulações dos testes de bombeamento com o modelo computacional MODFLOW (Mendonça 1996) são satisfatórias somente admitindo um aquífero vazante. Da mesma maneira, todos os parâmetros levantados, C-14, O-18 e CE, para um conjunto de 35 poços (Santiago et al. 1997) podem ser entendidos como resultantes de mistura dos aquíferos Rio da Batateira e Missão Velha atribuindo à contribuição do primeiro as características de água nova (C-14: pmC = 90), derivada de chuva moderna ( $\delta^{18}\text{O} = -3,2\text{‰}$ ) pouco mineralizada (CE = 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) e, do segundo aquífero, de água velha (C-14: pmC = 10), com memória do paleoclima ( $\delta^{18}\text{O} = -4,3\text{‰}$ ) e maior mineralização (CE = 650  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).



**FIGURA 6.** Variação em  $\delta^{18}\text{O}$ , pmC e condutividade elétrica nos poços da bateria de Juazeiro do Norte, em função da percentagem de água velha (Fonte: Mendonça 1996).

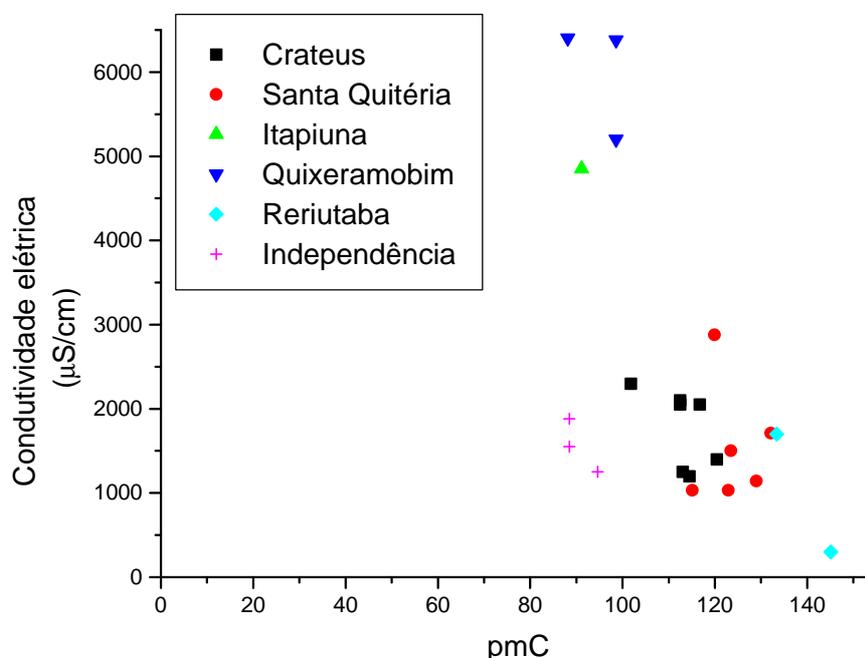
A figura 6 mostra os valores destes parâmetros em função da razão de mistura dos componentes. Vê-se, então, que processo de mistura é o predominante no entendimento também da salinização das águas do aquífero Rio da Batateira.

### POÇOS NO CRISTALINO: TAUÁ/CEARÁ

Tauá localiza-se no oeste médio do Ceará, na região dos Inhamuns. Com pluviosidade média anual em torno de somente 400 mm é uma das regiões mais atingidas pelas secas. Conseqüentemente, a salinidade das águas subterrâneas e superficiais é uma das mais elevadas do Ceará. O açude Favelas, construído para abastecer um projeto de irrigação, teve, em poucos anos, sua água inutilizada pela alta salinidade.

Durante a estação seca passada, um número elevado de dessalinizadores por osmose reversa foi instalado com a finalidade de aproveitar poços salinizados em vez de fornecer água potável por carro pipa.

Pesquisas nossas em várias áreas cristalinas do Ceará levaram à conclusão que neste domínio inexistente uma rede de fluxo regional. Assim, os poços exploram fraturas isoladas, muitas vezes com grandes diferenças de salinidade de uma fratura para a outra vizinha.

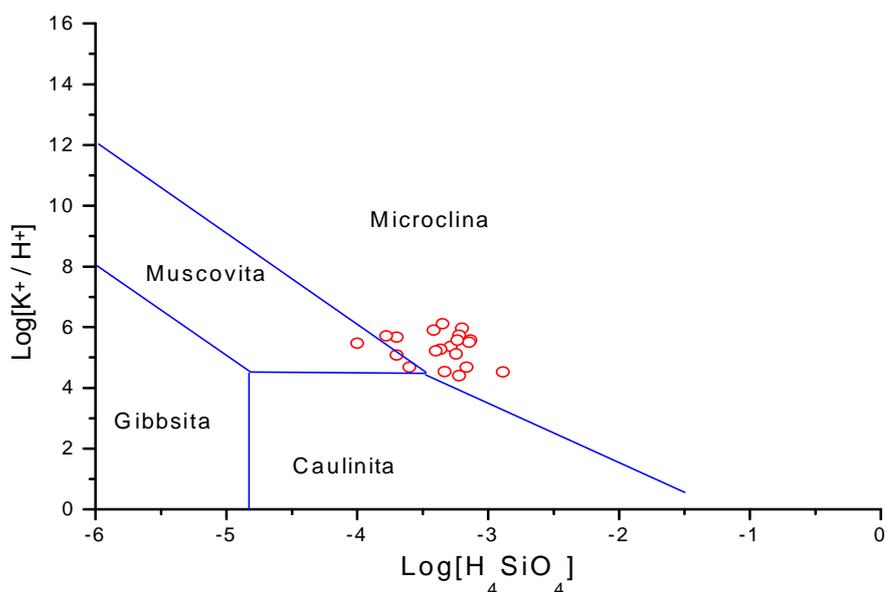


**Figura 7.** Condutividade elétrica em função da porcentagem do carbono moderno em águas subterrâneas no cristalino do Ceará (Fonte: Santiago 1986)

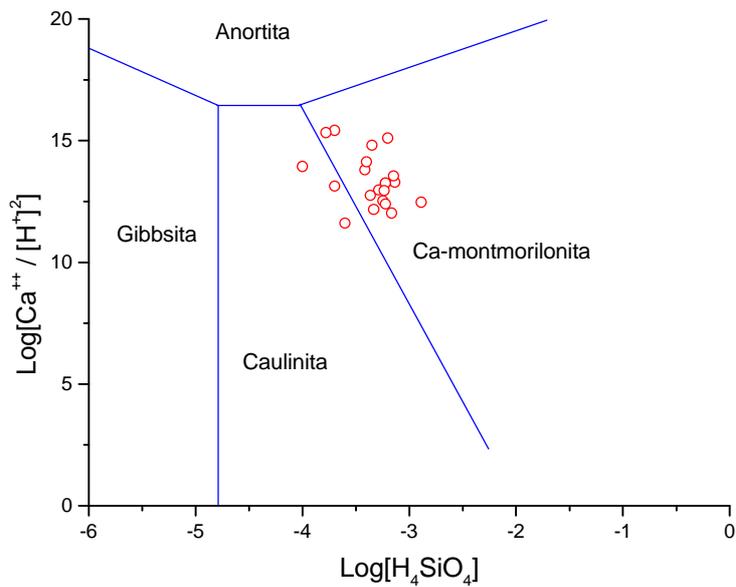
Medidas de C-14 revelaram, sem exceção, águas novas (Figura 7), com poucas dezenas ou centenas de anos de tempo de permanência no aquífero. Assim sendo, a alta salinização não pode ser interna, por dissolução no aquífero pois estes processos geoquímicos, em ambiente fechado, são relativamente lentos.

Mais prováveis são as fontes externas: produtos de intemperismo e, em áreas perto do mar, deposição de aerossóis, anualmente lixiviados e transportados pelo escoamento superficial para as fraturas. Este processo é favorecido pelo fato que o sistema de drenagem coincide, no cristalino, com as feições tectônicas.

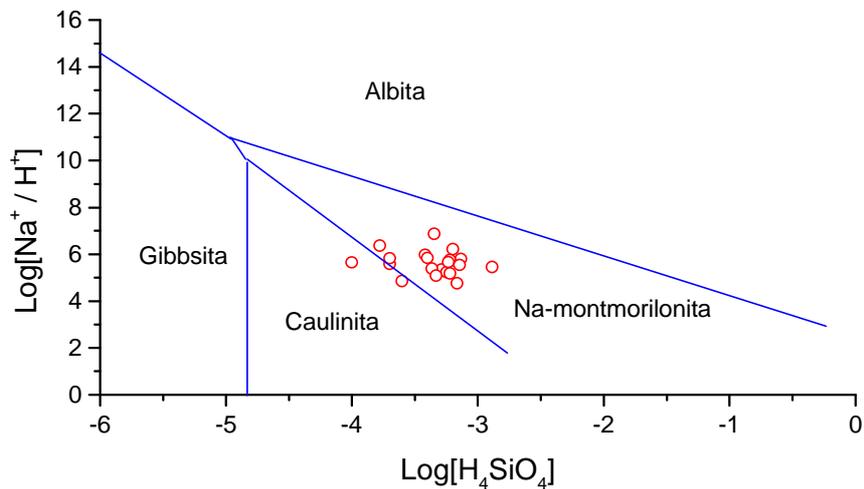
Analisamos a química de 43 poços e fontes de Tauá (Santiago et al. 1998) A condutividade elétrica espalha-se na vasta faixa de 420 a 4.880  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , com a elevada média de 1870  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Para identificação de possíveis fontes de salinização plotamos, os resultados em diagramas de estabilidade de feldspatos (Freeze and Cherry 1979), pois estes minerais, formados a grandes profundidades, tornam-se termodinamicamente instáveis na superfície e são, por isso, preferencialmente atingidos pelo intemperismo. As figura 8 a 10 representam os sistemas de estabilidade, onde vê-se a participação da microclina, da anortita e da albita no processo.



**Figura 8.** Diagrama de estabilidade do sistema microclina, muscovita, gibbsita e caulinita a 25°C e 1 atm com amostras de fontes e poços em Tauá (Santiago et al. 1998).



**Figura 9.** Diagrama de estabilidade do sistema anortita, gibbsita, Ca-montmorilonita, caulinita a 25°C e 1 atm com amostras de fontes e poços em Tauá (Santiago et al. 1998).



**Figura 10.** Diagrama de estabilidade do sistema albita, gibbsita, Na-montmorilonita, caulinita a 25°C e 1 atm com amostras de fontes e poços em Tauá (Santiago et al. 1998).

## **CONCLUSÃO**

Vários tipos de mecanismos de salinização são observados. É prática distinguir as fontes de sais que podem ser externas ou internas. No primeiro caso, depósitos de aerossóis ou maresia, produtos de intemperismo etc. são lixiviados da superfície e transportados para o aquífero ou reservatório; no segundo, a dissolução acontece dentro do aquífero que armazena água. O aumento da concentração de sais, a salinização propriamente dita, pode acontecer proporcional ao tempo de residência da água no aquífero pelas fontes internas ou por redução do volume da água, seja por evaporação de superfície livre (de açudes) ou após ascensão à superfície por capilaridade (em aquíferos rasos). A mistura de águas de salinidade diferente é uma causa trivial para influenciar na concentração de sais.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem às agências de financiamento à pesquisa CNPq, FINEP, FUNCAP e BNB que permitiram o desenvolvimento destas pesquisas.

## **REFERÊNCIAS**

- AGUIAR, R. B., SANTIAGO, M. F., MENDES FILHO, J. e FRISCHKORN, H. A origem dos sais nas águas subterrâneas dos aquíferos costeiros no município de Caucaia – Caucaia. Congresso 2000
- CLARK, I. e FRITZ, P. Environmental Isotopes in Hydrogeology, Lewis Publishers, New York, 1997.
- CRUZ, W. Alguns aspectos de circulação de água subterrânea em rochas cristalinas do Nordeste do Brasil. Sudene, Depto. de Recursos Naturais, 9p, também em série: Brasil. SUDENE Recife, Hidrogeologia 49, 56-70. 1967.
- CRUZ, W. B e F. A. F. Melo,. Estudo geoquímico preliminar das águas subterrâneas do Nordeste do Brasil. SUDENE Recife. Hidrogeologia. 19, 147p. 1968.
- FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. Groundwater . Englewood Cliffs, New Jersey; Prentide Hall, 604 p. 1979.
- FRISCHKORN, H.; TORQUATO, J.R. e SANTIAGO, M.F. Medidas isotópicas em aquíferos profundos na região centro – leste do Piauí. Anais do 3<sup>o</sup> Congr. Bras. Ág. Subt., Fortaleza, 42-51, 1984.

- FRISCHKORN, H., SANTIAGO, M.F. e TORQUATO, J.R. Dados isotópicos e hidroquímicos da porção oriental da Bacia Potiguar. *Anais do 5º Congr. Bras. Ág. Subt.*, São Paulo, 09/88 p. 144-153, 1988.
- LEITE, C.E.S. O Potencial de Água Subterrânea do Semi-árido Brasileiro, 1º Simpósio sobre Captação de Água de Chuva no Semi-árido Brasileiro <http://www.netcap.com.br/%7Eirpaa/Simposio/pal12.htm>)
- MENDONÇA, L. A. R. Modelagem matemática, química e isotópica de uma bateria de poços na cidade de Juazeiro do Norte / Ceará. Dissertação de mestrado, Recursos Hídricos- UFC, Fortaleza, 122 p. 1996.
- OLIVEIRA, S.P. B. e BATISTA, J.J. Influência do Índice de Aridez e da Litologia nos Processos de Salinização das Águas do Aquífero Fissural na Região Fissural na Região Semi-árida do Nordeste. ABRH-Vitória)
- REBOUÇAS, A.C. Le problème de l'eau dans le zone semi-aride du Brésil. Evaluation de ressources, orientation pour la mise en valeur. Tese de doutoramento, Strasburg, Université Louis Pasteur. França, 291p. 1973
- SANTIAGO, M. M. F. Mecanismo de salinização em regiões semi-áridas. Estudo dos açudes Pereira de Miranda e Caxitoré, no Ceará. Tese de doutorado. USP, São Paulo. 176p. 1984.
- SANTIAGO, M.F.; FRISCHKORN, H. e SEREJO, A.N. Estudo de poços profundos no cristalino, durante um período de seca usando medidas isotópicas. *Anais do 4º Congr. Bras. Ág. Subt.* Brasília, 4 - 7/11/1986, p.391 - 403, 1986.
- SANTIAGO, M.F.; SILVA, C. M. S.; MENDES FILHO, J. and FRISCHKORN, H. Characterization of groundwater in the Cariri (Ceará/Brazil) by environmental isotopes and electric conductivity *Radiocarbon* , 39(1):49 – 60, 1997.
- SANTIAGO, M.F.; MENDES FILHO, J. FRISCHKORN, H. e LIMA C.H. Processos de salinização de água subterrânea no cristalino dos Inhamuns no nordeste do Brasil. 4º Congresso Latinoamericano de Hidrologia Subterranea. Montvideo, vOl. 2: 1068 – 1078. 1998.
- SCHOFF, S.L. Flushing of ancient sea water from Pre-Cambrian rocks in the upper Paraíba basin, State of Paraíba. SUDENE, Recife, 27p. 1967.

- STARINSKY, A.; M. BIELSKI, A. ECKER and G. SETINITZ. Tracing the Origin of Salts in Groundwater by Sr Isotopic Composition (The Crystalline Complex of the Southern Sinai, Egypt) *Isotope Geoscience*, 1: 257 - 267. 1983.
- SUASSUNA, J. O Processo de Salinização das Águas Superficiais e Subterrâneas do Nordeste Brasileiro, - <http://apipucos.fundaj.gov.br/docs/tropico/desal/orig2.html>)
- TARDY, Y. Characterization of the Princip[al Weathering Types by the Geochemistry of Waters from some European and African Crystalline Massifs. *Chemical Geology*. 253 –27. 1971.